

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JONATHAN LUIZ GIRON

**ANÁLISE DE TRAÇOS DE CONCRETO BETUMINOSO MODIFICADO
COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS PELO
PROCESSO SECO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2020

JONATHAN LUIZ GIRON

**ANÁLISE DE TRAÇOS DE CONCRETO BETUMINOSO MODIFICADO
COM INCORPORAÇÃO DE BORRACHA DE PNEUS PELO
PROCESSO SECO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra

TOLEDO

2020



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 238

**Análise de traços de concreto betuminoso modificado com
incorporação de borracha de pneus pelo processo seco**

por

Jonathan Luiz Giron

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16:00 h do dia **01 de Julho de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. Me. Andreas Jerke
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)
Orientadora

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Gustavo Savaris
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradecer à minha família, excepcionalmente aos meus pais, Josefa Gilvanda da Cruz Giron e Luiz Roberto Giron, agradeço profundamente o apoio e carinho recebido durante toda minha vida. Demonstro minha gratidão também, a minha namorada Suelyn Marzinkowski pelo apoio e compreensão.

Gostaria de mostrar minha gratidão também ao meu orientador Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra, o qual teve grande importância para a realização deste trabalho, sanando minhas dúvidas e me auxiliando no mesmo.

Aos técnicos do laboratório de materiais da UTFPR-TD, Wilson Leobet e Marcos Vinicius Schlichting pelo auxílio prestado durante a realização dos ensaios da pesquisa.

Aos meus amigos, João Marcelo Riedi, Renan Schimidt Profeta Panssonato e Ricardo Almeida Ferrarese amizade que foi adquirida na formação e pela ajuda prestada na realização dos ensaios.

RESUMO

GIRON, Jonathan L. **Análise de traços de concreto betuminoso modificado com incorporação de borracha de pneus pelo processo seco.** 2020. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Mesmo sendo o principal modal do Brasil, as rodovias sofrem na questão de malha e no seu estado de conservação, mostrando assim, um grande viés para o uso de pó de borracha no asfalto, segundo pesquisas além de solucionar o problema na vida útil das rodovias, ajudaria solucionar o problema ambiental causado pelos pneus. Assim o presente trabalho busca contribuir para técnica do processo seco, a qual é mais acessível monetariamente e há menos estudos. Para comprovar a possibilidade de implantação usaremos o método de ensaio Marshall, onde através deste ensaio busca-se estabelecer o melhor teor de ligante para o traço utilizado na pavimentação da cidade de Toledo-PR. Para isso foram moldados corpos de prova de concreto asfáltico betuminoso, variando o teor de ligante e uma substituição de 2% de borracha. Os resultados mostraram que para este traço a quantidade de borracha foi demasiada, não atingindo os valores mínimos da norma brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio Marshall; Pó de pneu; Processo seco; Asfalto.

ABSTRACT

GIRON, Jonathan L. **Trace analysis of modified bituminous concrete with incorporation of rubber tires by dry process**. 2020. 52 p. Graduation Work - Civil Engineering. Federal Technological University of Paraná. Toledo, 2020.

Even being the main modal in Brazil, road transport through highways suffers from the issue of the restricted network of paved roads and its state of conservation. Moreover, a significant amount of unserviceable tires are generated on a daily basis, and this is an environmental problem with regard to their destination. At this point, one of the alternatives for the destination of unserviceable tires is their incorporation into the asphalt concrete through the dry process in order to improve their properties. Thus, this work seeks to contribute to the dry process technique, which is more accessible and there are fewer studies, analyzing specimens with replacement of stone dust by rubber tire dust (at a dosage of 2%) in asphalt mixtures with different levels of asphalt binder (6.5; 7 and 7.5%) through Marshall tests. In addition, reference test bodies (without rubber incorporation, but with different asphalt binder contents) were also analyzed. The results showed that in the reference test bodies, all showed Marshall stability values above the minimum values of the standard, however, the incorporation of 2% of rubber powder from tires combined with the analyzed dosages, did not present satisfactory results in the Marshall test, in view of the low adherence between the binder and the rubber in the dry process.

KEY WORDS: Marshall test; Tyre dust; Dry process; Asphalt.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Gráfico da classificação do estado geral (%) | 10 |
| Figura 2 - Camadas do Pavimento Flexível | 11 |
| Figura 3 - Descarte irregular de pneus inservíveis..... | 18 |
| Figura 4 - Aplicação do asfalto com borracha como “tratamento superficial” | 19 |
| Figura 5 – Aplicação do asfalto com borracha como camada de reforço | 19 |
| Figura 6 - Ilustração das partículas no processo a seco | 20 |
| Figura 7 - Estabilidade Marshall | 22 |
| Figura 8 - Gráficos da situação da estrada analisada | 23 |
| Figura 9 – Procedimento do ensaio Marshall | 27 |
| Figura 10 - Cimento asfáltico de petróleo..... | 28 |
| Figura 11 - Agregados usados | 28 |
| Figura 12 - Processo de obtenção do CRP | 29 |
| Figura 13 - Ensaio de Granulometria | 30 |
| Figura 14 - Procedimento realizado na iniciação científica | 31 |
| Figura 15 - Realização do ensaio Marshall | 32 |
| Figura 16 – Lavagem, secagem e pesagem | 34 |
| Figura 17 - Mistura na chapa aquecida | 35 |
| Figura 18 - Acomodação no molde de compactação | 36 |
| Figura 19 - Extrator de amostras e repouso dos corpos de prova..... | 36 |
| Figura 20 - Mensuração da altura | 37 |
| Figura 21 - Estufa e ensaio Marshall..... | 37 |
| Figura 22 - Mistura 1 (sem pneu e 6,5% de ligante)..... | 39 |
| Figura 23 - Mistura 3 (sem pneu e 7% de ligante)..... | 39 |
| Figura 24 - Mistura 5 (sem pneu e 7,5% de ligante)..... | 40 |
| Figura 25 - Comparativo dos corpos de prova sem borracha..... | 40 |
| Figura 26 - Mistura 2 (com pneu e 6,5% de ligante)..... | 41 |
| Figura 27 - Mistura 4 (com pneu e 7% de ligante)..... | 41 |
| Figura 28 - Corpo de prova desmanchando | 42 |
| Figura 29 - Excesso de ligante | 43 |
| Figura 30 - Curva do teor de ligante | 45 |
| Figura 31 - Corpo de prova rompido | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1– Condição da superfície do pavimento | 16 |
| Tabela 2 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico | 16 |
| Tabela 3 - Massa mínima de amostra | 30 |
| Tabela 4 - Conjunto de peneiras sucessivas | 30 |
| Tabela 5 - Resultado da iniciação científica | 31 |
| Tabela 6 - Ensaio preliminar..... | 32 |
| Tabela 7 - Traço | 33 |
| Tabela 8 - Dosagens | 34 |
| Tabela 9 - Média da altura | 38 |
| Tabela 10 - Fator de correção | 38 |
| Tabela 11 - Estabilidade Marshall para misturas sem borracha..... | 43 |
| Tabela 12 - Estabilidade Marshall para misturas com borracha..... | 44 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANIP | Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos |
| CAP | Cimentos Asfálticos de Petróleo |
| CBUQ | Concreto Betuminoso Usinado a Quente |
| CNT | Confederação Nacional dos Transportes |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CONTRAN | Conselho Nacional de Transito |
| CRP | Partículas de borracha |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DP | Asfalto com Incorporação de Borracha pelo Processo Seco |
| FC | Fator de correção |
| NBR | Norma Brasileira |
| SWD | Asfalto com Incorporação de Borracha pelo Processo Semi-úmido |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| WP | Asfalto com Incorporação de Borracha pelo Processo Úmido |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS | 13 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 13 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.2. PROBLEMÁTICA DOS PNEUS INSERVÍVEIS | 17 |
| 2.3. INCORPORAÇÃO DA BORRACHA NO ASFALTO | 18 |
| 2.3.1 Processo úmido | 19 |
| 2.3.2 Processo seco | 20 |
| 2.3.3 Escolha do processo | 21 |
| 2.4 INCORPORAÇÃO PELO PROCESSO A SECO | 21 |
| 2.5 ENSAIOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS | 25 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 28 |
| 3.1. MATERIAIS | 28 |
| 3.2. MÉTODOS | 29 |
| 3.2.1. Pó de borracha | 29 |
| 3.2.2. Caracterização granulométrica dos resíduos de pneu | 29 |
| 3.2.3 Ensaio preliminares e estudo de traço | 31 |
| 3.2.4. Procedimentos experimentais | 33 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 38 |
| 4.1 ALTURA | 38 |
| 4.2 ENSAIO MARSHALL | 39 |
| 4.3 ESTABILIDADE MARSHALL | 43 |
| 5. CONCLUSÃO | 47 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |

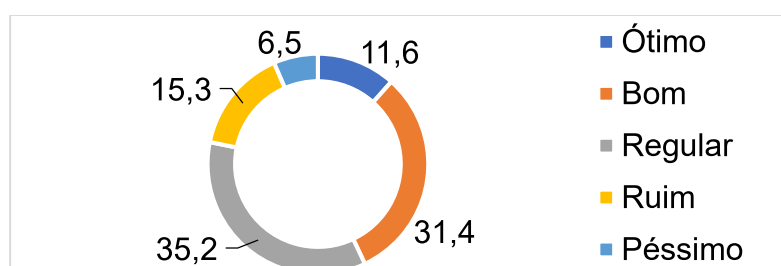
1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país continental com uma área aproximadamente de 8.515.000km², sendo o 5º maior em área territorial do mundo. Para uma nação deste porte, levar um produto de um ponto a outro do país é indispensável ter meios de transporte adequados. Neste ponto, o transporte rodoviário é o principal sistema logístico brasileiro possuindo uma malha rodoviária pavimentada com mais de 212 mil quilômetros. Pesquisas da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2018), apontam para esses dados, mostrando que cerca de 60% dos transportes no Brasil é realizado pelas rodovias.

Apesar da predominância do transporte rodoviário, esse modal enfrenta grandes problemas, além de ser relativamente caro aos demais modais, tem uma alta taxa de acidentes e de poluição. No Brasil esse meio de transporte ainda enfrenta outros problemas no que tange a manutenção, obras de melhoria e fiscalização como, por exemplo, trincas e buracos na pista de rolamento, falta de faixas de acostamento e duplicações, além da existência de veículos que ultrapassam o limite de peso frente às poucas balanças para fiscalizar.

Em virtude a esses problemas, um levantamento realizado pelo Fórum Econômico Mundial (The Global Competitiveness Report 2017-2018) comprovou a situação classificando as rodovias brasileiras na posição 103º entre 137 países avaliados. Neste tocante, pesquisa realizada pela CNT, 2018 avaliou um trecho pavimentado de 107.161km, onde analisaram o pavimento, sinalização e a geometria da via, chegando nos dados representados no gráfico da Figura 1.

Figura 1 - Gráfico da classificação do estado geral (%)

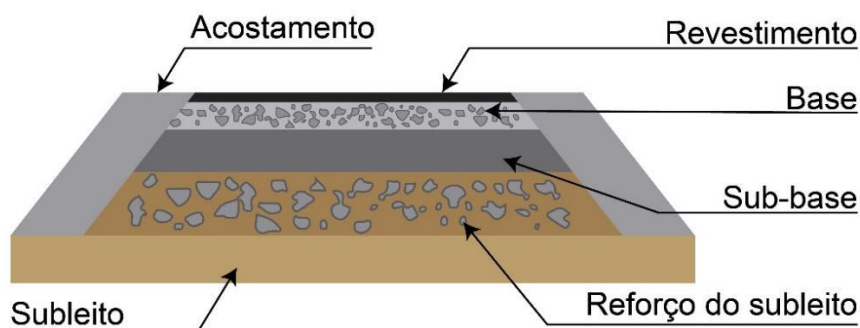


Fonte: Adaptada da CNT (2018).

Dos problemas mais recorrentes temos o pavimento, que é basicamente a infraestrutura do transporte rodoviário e se divide em três grandes grupos, pavimento rígido (pavimento de concreto), pavimento semirrígido (subdividido em tradicional ou invertido) e pavimento flexível (pavimento asfáltico).

Com maior relevância o pavimento flexível é o mais usual em nosso país, presente em 97% das rodovias brasileiras, geralmente é constituído de revestimento betuminoso sobre camadas puramente granulares (SINICESP,2010). O revestimento é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento. A base é a camada destinada a resistir aos esforços oriundos dos veículos e distribuí-los adequadamente às camadas inferiores. As demais camadas Sub-base e reforço são usadas por circunstâncias técnico-econômicas, como, por exemplo, a baixa capacidade de suporte do subleito (SENÇO,1997). A Figura 2 abaixo demonstra as camadas do pavimento flexível.

Figura 2 - Camadas do Pavimento Flexível



Fonte: O Autor (2020).

O ligante asfáltico presente na camada revestimento, atua como um agente aglutinante e impermeabilizante, sendo responsável pela resistência à ação mecânica de desagregação produzida pelas cargas provindas do tráfego e à ação da água. Os agregados minerais, em contrapartida, fornecem resistência mecânica e flexibilidade à camada de rolamento quando unido pelo ligante asfáltico (BERTOLLO, 2002). O ligante também conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP) é um material caracterizado pela norma DNIT 095/2006-EM e especificados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), resolução ANP nº 30/2007. São

quatro tipos de CAP, classificados por sua penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP85/100 e CAP 150/200 (SINICESP,2010).

Além do problema na qualidade do asfalto brasileiro, temos também o problema ambiental com os pneus inservíveis (pneu que apresente danos irreparáveis em sua estrutura), pois o descarte inadequado de pneus constitui, atualmente, um dos mais graves problemas ambientais e de saúde pública no contexto urbano. No Brasil, estima-se que 100 milhões de pneus inservíveis foram descartados no meio ambiente em lixões, terrenos baldios, rios e lagos entre outros. Além disso, estima-se que a cada ano, das dezenas de milhões de pneus novos são fabricados no país, uma parcela significativa ainda terá uma destinação inadequada após o uso (ANIP, 2017).

Para deter o avanço desse resíduo é preciso reciclar os pneus de maneira ambientalmente segura. Devido ao significativo volume descartado, associado a sua grande durabilidade, com o tempo de decomposição estimada em 600 anos, os pneus inservíveis, possuem um alto risco de geração de impactos ambientais. Vale pontuar ainda que a resolução 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA (BRASIL,2009), estabelece que os fabricantes e os importadores ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional.

Das alternativas no âmbito da construção civil, destaca-se a adição do pó de borracha dos pneus ao concreto betuminoso usado no revestimento asfáltico, melhorando assim às condições de tráfego e impermeabilidade do pavimento. (BERNUCCI; MOTTTA; CERATTI; SOARES, 2008, p. 11). A avaliação da resistência desta camada do pavimento pode ser realizada através do ensaio *Marshall*, descrito pela norma DNIT 031/2004, onde é possível a obtenção do parâmetro de estabilidade *Marshall*, que remete a resistência a compressão radial e a fluência *Marshall* a que o pavimento está submetido devido às cargas do tráfego.

Desta forma, frente a problemática da durabilidade do pavimento rodoviário e do problema ambiental causado pelos pneus inservíveis, o presente trabalho aborda os efeitos da adição de resíduos de pneu em misturas de concretos betuminosos na estabilidade e fluência *Marshall*.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diversas pesquisas apontam para a baixa qualidade da malha rodoviária brasileira, mesmo ela sendo o principal modal para o transporte de insumos e pessoas. O presente trabalho visa contribuir no âmbito da viabilidade na incorporação de borracha de pneus inservíveis em concretos betuminosos. Mostrando assim uma possível solução para apaziguar à problemática ambiental representada por pneus inservíveis.

Vale ressaltar que a inserção do pó de borracha no asfalto já tem diversos estudos apontando inúmeros benefícios à mistura, dentre os quais podem ser citados a redução do envelhecimento, o aumento da flexibilidade, a redução de deformações permanentes, a melhoria da susceptibilidade térmica, a redução do ruído, o aumento da vida de fadiga, a redução da aquaplanagem durante as chuvas e a melhor aderência pneu-pavimento, etc. (WAY,2012; SPECHT et al., 2002; PINHEIRO et al., 2004).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da incorporação de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas, obtidas pelo processo seco e através do ensaio *Marshall*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar os efeitos da incorporação de 2% de borracha de pneus em substituição ao pó de pedra na estabilidade e fluência *Marshall* em concretos betuminosos.
- Analisar os efeitos de diferentes dosagens de ligantes asfálticos, variando entre 6,5% a 7,5% o teor de ligante e obter o ponto ótimo no teor de ligante.
- Comparar os valores do ensaio *Marshall* obtidos com os valores obtidos a partir de um traço de concreto betuminoso utilizado para pavimentação de ruas na cidade de Toledo-PR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DO PAVIMENTO NO BRASIL

Conforme indicado no Sistema Nacional de Viação (SNV, 2018), há no país 213.453km de rodovias pavimentadas e 1.507.248km de rodovias não pavimentadas, que correspondem, respectivamente, a 12,4% e 87,6% da extensão total. Outro fator de importância é a densidade da malha rodoviária que é basicamente a extensão da via pela área, em virtude do tamanho do nosso país ela é de apenas 25,1 km para cada 1.000 km².

A baixa densidade de ligações evidencia-se, notadamente, quando comparada com a de outros países de dimensão territorial semelhante, como Estados Unidos e México, pois a densidade brasileira corresponde, a apenas 5,7% da densidade da malha rodoviária pavimentada dos Estados Unidos e a 35,8% da densidade do México (CNT, 2018).

Outro ponto é a baixa qualidade das rodovias pavimentadas no Brasil, decorrendo de uma manutenção insuficiente e do não atendimento à exigência técnica da capacidade de suporte das camadas. Portanto, esses problemas são uns dos responsáveis pelo “Custo Brasil” (Termo usado para uma série de desvantagens que o produto nacional tem em competir com os produtos importados), pois aumenta o custo de uma matéria prima chegar de um ponto a outro.

Para tanto, um pavimento deve suportar os efeitos das mudanças climáticas, permitir deslocamento suave, não causar desgaste excessivo dos pneus e nível alto de ruídos, ter estrutura forte, resistir ao fluxo de veículos, permitir o escoamento da água na sua superfície, possuir sistemas de drenagem eficientes para dar vazão à água da chuva e ter boa resistência a derrapagens (CNT, 2018). Neste ponto a CNT, 2019 classifica as condições do pavimento em:

- a) **Perfeito** - O pavimento apresenta ótima condição (sem ocorrência de defeitos) e existe perfeita regularidade na camada de revestimento.
- b) **Desgastado** - O pavimento apresenta sinais de desgaste, com efeito de desagregação e/ou observa-se a presença de corrugação e/ou exsudação. A exsudação se dá pelo excesso de ligante na mistura asfáltica, tornando a

superfície do revestimento mais lisa, com manchas escurecidas. Já as corrugações são deformações transversais ao eixo da pista, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda de alguns centímetros ou dezenas de centímetros.

- c) **Trinca em malha/ remendos** - Existem dois tipos de trincas, as trincas em bloco são decorrentes da alternância diária de temperatura. Normalmente não é um defeito associado à carga, embora esta possa aumentar sua severidade. Já as trincas do tipo “couro de jacaré” consistem em trincamentos por fadiga e sinalizando o final de sua vida útil. Já o remendo caracteriza-se pelo preenchimento de buracos ou de qualquer outra cavidade ou depressão com massa asfáltica. Nesse caso, estão incluídos apenas os remendos mal executados (sem a devida remoção da camada anterior do revestimento e correto preenchimento e nivelamento), que geram trepidação no veículo.
- d) **Afundamento, ondulação ou buraco** O pavimento pode apresentar defeitos como afundamento, ondulação e buraco em conjunto ou isoladamente. Podem ser afundamentos locais ou trilhas de roda. Os afundamentos são depressões ocasionadas pelo tráfego intenso de veículos, além da combinação do excesso de carga de veículos pesados e a elevada temperatura. As ondulações são deformações transversais ao eixo da pista, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda, que é da ordem de metros. Os buracos são cavidades no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas subjacentes.
- e) **Destruído** O pavimento apresenta elevada quantidade de buracos ou ruína total da superfície de rolamento. Nesse caso, a condição da superfície do pavimento obriga os veículos a trafegarem em baixa ou baixíssima velocidade.

Na Tabela 1 é apresentada a condição da superfície dos pavimentos analisados no Brasil CNT,2018, onde é possível observar que há grande porcentagem de problemas nas estradas, tanto na gestão concedida como na pública.

Tabela 1– Condição da superfície do pavimento

| Condição da superfície do pavimento | Gestão Concedida | | Gestão Pública | |
|-------------------------------------|------------------|------------|----------------|------------|
| | Km | % | Km | % |
| Perfeito | 7.061 | 36 | 18.749 | 21,4 |
| Desgastado | 10.952 | 55,9 | 45.630 | 52,2 |
| Trinca em malha/remendos | 1.535 | 7,8 | 18.769 | 21,4 |
| Afundamentos/ondulações/buracos | 30 | 0,2 | 3.614 | 4,1 |
| Destruído | 20 | 0,1 | 801 | 0,9 |
| TOTAL | 19.598 | 100 | 87.563 | 100 |

Fonte: Adaptada da CNT (2018).

Como pode se observar na Tabela 1, é notável a baixa qualidade do asfalto brasileiro, sendo ele de gestão privada ou pública. Pois mesmo com uma melhora, a gestão concedida não alcançou nem 40% de condição perfeita.

A Tabela 2 abaixo apresenta os valores mínimos exigidos pela Norma DNIT 031/2006 – ES, que disciplina o procedimento para determinação dos valores em misturas asfálticas.

Tabela 2 - Requisitos de dosagem de concreto asfáltico

| Características | Método de ensaio | Camada de rolamento | Camada de ligação |
|---|------------------|---------------------|-------------------|
| Porcentagem de vazios,% | DNER-ME 043 | 03-05 | 04-06 |
| Relação Betume/vazio | DNER-ME 043 | 75 - 82 | 65 - 72 |
| Estabilidade mínima, kgf (75 golpes) | DNER-ME 043 | 500 | 500 |
| Resistência à tração por compressão diametral | DNER-ME 138 | 0,65 | 0,65 |

Fonte: DNIT(ES 031/2006).

Observa-se que a estabilidade mínima exigida pelo DNIT para camada de rolamento e de ligação medida através do Ensaio *Marshall* é de 500 kgf. Ou seja, dosagens com valores inferiores a esse não são permitidos pela norma.

2.2. PROBLEMÁTICA DOS PNEUS INSERVÍVEIS

Pneu é o componente de um sistema de rodagem composto de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais. Quando montados em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sobre pressão, transmitem a tração dada à aderência ao solo, sustentando o peso do veículo e resistindo ao esforço provocada pela reação do solo (CONAMA,2009).

O pneu inservível é aquele que apresente danos irreparáveis em sua estrutura, aquele que chegou no final da sua vida útil, não tendo mais condições de ser utilizado para a circulação ou reforma. A Resolução 558/80 do Contran, no seu artigo 4º, define o que pode ser considerado um pneu inservível.

Art. 4º - Fica proibida a circulação de veículo automotor equipado com pneu cujo desgaste da banda de rodagem tenha atingido os indicadores ou cuja profundidade remanescente da banda de rodagem seja inferior a 1,6 mm (Resolução 558/80 – Contran)

Mesmo com essa resolução, foram colocados no mercado de reposição 729.214,04 toneladas de pneus no ano de 2016. Mesmo quase atingindo a meta com 493.399,13 toneladas de pneus com a destinação correta, ainda tem uma grande quantidade sem a destinação correta (IBAMA, 2016). Com um tempo de decomposição estimada em 600 anos, associado ao grande volume, os pneus inservíveis, possuem um alto risco de geração de impactos ambientais, pois devido ao seu formato, se for aterrado inteiro se torna volumoso, se ficar ao ar livre tende a reter a água de chuva criando um ambiente propício a proliferação de vetores de doenças, como por exemplo, o mosquito “Aedes aegypti”. Já a queima de cada pneu é liberados 10 litros de óleo, que podem contaminar o solo e o lençol freático, além de gases como carbono, dioxinas, hidrocarbonetos e outras substâncias também tóxicas e cancerígenas (RODRIGUES JORGE et al., 2004). A Figura 3 mostra um exemplo de descarte irregular de pneus em lixões no Brasil.

Figura 3 - Descarte irregular de pneus inservíveis.



Fonte: G1(2016)

2.3. INCORPORAÇÃO DA BORRACHA NO ASFALTO

Uma das soluções mais aceitas para o problema dos pneus inservíveis é a incorporação da borracha moída em misturas asfálticas. Pois, levando em conta os dados fornecidos no item 2.1 existe uma grande demanda de asfalto, visto a baixa quantidade de vias pavimentadas e a pequena densidade da malha rodoviária brasileira.

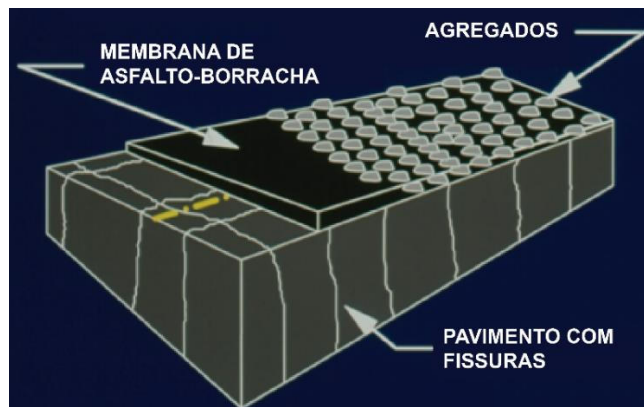
Existe uma grande divisão nos métodos conhecidos de incorporação da borracha de pneus na mistura asfáltica (Processo úmido e Processo seco). Esta separação se dá pelo momento da adição das partículas de borracha e pela granulometria usada, sendo o processo úmido uma mistura entre as partículas de borracha finas e o ligante asfáltico antes do acréscimo dos agregados. No processo seco há uma mistura da borracha com granulometria maior aos agregados antes da adição do ligante asfáltico.

Segundo Way (2012), pode-se aplicar o asfalto com borracha como um “tratamento superficial” fazendo assim uma camada sobre o pavimento existente, de modo a retardar a formação de trincas por reflexão em pavimentos. Esse processo dá se o nome de Stress Absorbing Membrane (SAM), conforme ilustra a Figura 4.

Ainda, o asfalto com borracha pode ser aplicado entre camadas de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), exercendo a função de selante de trincas

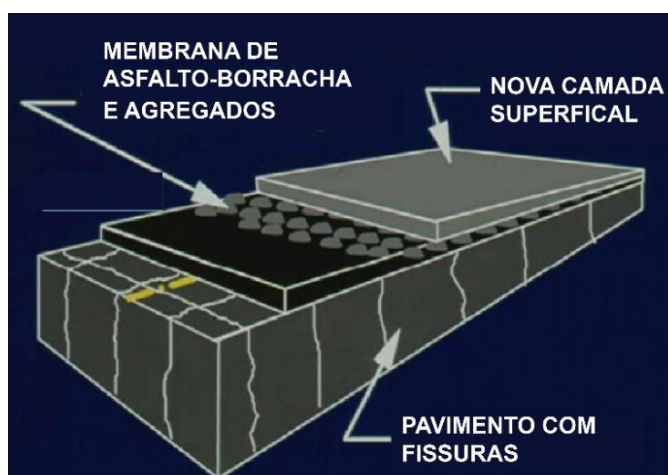
e como camada de reforço. A esse processo dá-se o nome de Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI), conforme ilustra a Figura 5.

Figura 4 - Aplicação do asfalto com borracha como “tratamento superficial”



Fonte: Way (2012).

Figura 5 – Aplicação do asfalto com borracha como camada de reforço



Fonte: Way (2012).

2.3.1 Processo úmido

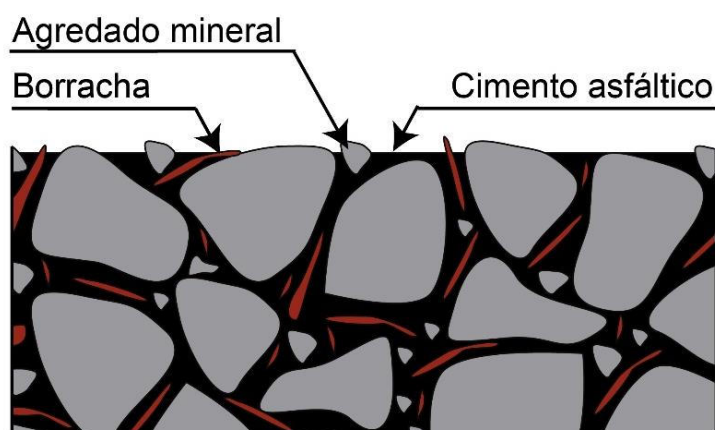
No processo úmido (WP), o teor de borracha é pequeno, pois o pó de borracha (partículas passantes na peneira nº 40) é misturado previamente ao ligante, representando geralmente de 15 a 20% da massa do ligante, seguindo a norma DNIT 111/2009, chegando assim próximo de 1% da massa total da mistura. Esse processo é efetivo para as características de elasticidade e resistência ao envelhecimento para o ligante asfáltico original (SOARES; ASSIS, 2008).

Segundo Chavez (2019) esse processo tem um bom comportamento contra à umidade, deformações permanentes e trincas por fadiga. No entanto, sua fabricação requer equipamento específico e, portanto, não é lucrativo para projetos de magnitude média a baixa.

2.3.2 Processo seco

No processo seco (DP), a borracha com granulometria bem maior é misturada com o agregado antes de serem adicionadas ao cimento asfáltico. Neste caso, existe a substituição de uma parcela dos agregados por partículas de borracha. As melhorias à mistura asfáltica são possíveis, desde que na sua fabricação seja possível obter uma mistura homogênea (FHWA, 1993). Como pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 - Ilustração das partículas no processo a seco



Fonte: O Autor (2020).

A mistura modificada com adição de borracha via seca só deve ser utilizada em misturas asfálticas a quente (concreto asfáltico convencional ou com granulometria especial descontínua – gap-graded, por exemplo), não devendo ser usada em misturas a frio, pois a interação entre a borracha e o ligante é maior em misturas a quente (SPECHT, 2004).

No processo PlusRide®, os agregados apresentam descontinuidade na sua curva granulométrica para a inserção de partículas de borracha de até ¼" e geralmente com teor de 3% em relação ao peso total da mistura (BERTOLLO, 2002). A porcentagem de ligante asfáltico geralmente varia entre 7,50 e 9,0%, o que é

substancialmente maior do que a usualmente utilizada, e o volume de vazios desejado encontra-se entre 2 e 4%. (FHWA, 1993).

2.3.3 Escolha do processo

O processo seco é considerado mais econômico que o processo úmido, porém ainda acarreta grandes dúvidas quanto à sua capacidade de aumentar a durabilidade do pavimento, pois estudos mostram que o processo úmido garante resultados melhores e possui capacidade de aumentar até dez vezes a durabilidade do pavimento (MACHADO, 2013). Desta forma, pesquisas ainda são necessárias com o objetivo de viabilizar a utilização do processo seco.

Segundo Tahami (2019) o processo seco pode ser significativamente mais interessante que o processo úmido, pois apresenta menores custos, devido a sua produção ser bem mais simples. Além disso, este processo permite usar maior porcentagem de borracha, resolvendo melhor o problema ambiental levantado anteriormente no item 2.1.

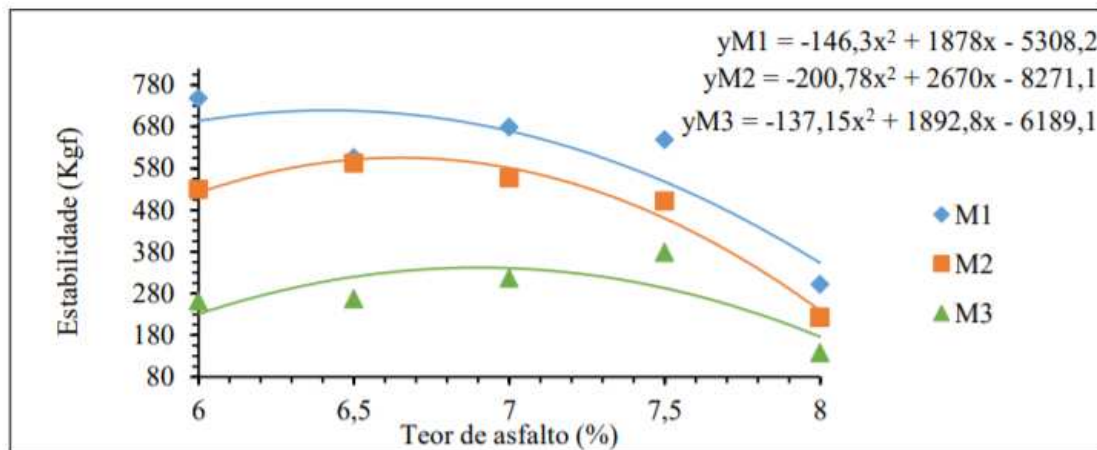
Visto a grande diferença na quantidade de borracha nos dois processos, se optou pelo processo seco com o objetivo de contribuir para a logística reversa dos pneus, como apontado no decorrer do trabalho, o Brasil tem uma boa quantidade de estradas sem pavimentação onde o uso de borracha poderia apaziguar o problema ambiental causado por ela. O ponto é a pequena quantidade de pesquisas nesse processo em comparação ao processo úmido.

2.4 INCORPORACAO PELO PROCESSO A SECO

Para comprovar a eficácia do DP Barbosa (2016), realizou um estudo a respeito dessa incorporação de 1,0; 1,5; e 2,0% de borracha, substituindo uma fração do agregado miúdo e chamando as mistura (M1), (M2) e (M3) respectivamente. Foram utilizada brita 19mm, brita 12mm e pó de pedra como agregados. Seus resultados da dosagem *Marshall* forneceram um teor 4,8% de ligante para a referência, 6,5% para a mistura com adição de 1,0% de borracha e 7,1% para a mistura com 1,5% de borracha. A mistura com 2,0% de borracha não apresentou resultados satisfatórios e foi considerada inadequada para ser utilizada na camada de revestimento asfáltico,

pois os valores estão abaixo de 500kgf para todas as dosagens de ligantes. Como pode ser vista na Figura 7.

Figura 7 - Estabilidade Marshall



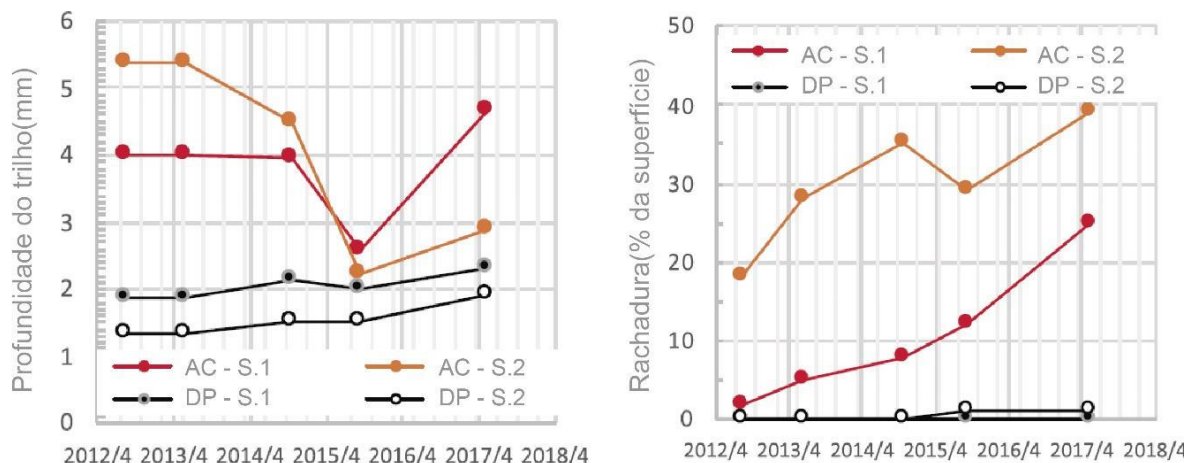
Fonte: Barbosa (2016).

Sendo assim, a pesquisa de Barbosa (2016) demonstrou que a mistura modificada tem tendência a ser menos rígida que a mistura de referência, fator esse que pode ser explicado pela elevada deformação elástica que a borracha confere à mistura.

Avaliando a durabilidade das misturas de asfalto com incorporação de borracha pelo processo seco (DP). Picado-Santos (2019) analisou o comportamento desta mistura na Estrada Nacional Portuguesa após 8 anos, onde havia sido feito um recapeamento utilizando o processo em questão.

Picado-Santos (2019) usou a partícula de borracha muito mais fina que as pesquisas em geral, se comparando ao tamanho utilizado geralmente no processo úmido (0–0,6 mm de tamanho nominal). Obtendo um desempenho semelhante ao asfalto de borracha pelo processo úmido, com uma alta resistência a trincas por fadiga. A incorporação de borracha foi de cerca de 20% (do peso total do ligante). A Figura 8 apresenta um comparativo entre dois trechos com cimento asfáltico tradicional (CA) e mais dois trechos com asfalto DP, onde as análises começaram por volta de 2 anos da conclusão da obra.

Figura 8 - Gráficos da situação da estrada analisada



Fonte: Picado-Santos (2019).

Como se pode ver na Figura 8, os dados favorecem a parte da estrada onde foi recapada utilizando a borracha. A pesquisa de Picado-Santos (2019) mostra que é possível fazer um asfalto de qualidade usando o processo a seco, pois com o passar de 8 anos, se verificou que o pavimento, projetado para uma vida útil de 10 anos, mostrou ter capacidade de 12 anos de vida útil e 70% do percurso poderia progredir além dos 16 anos de vida. Portanto, reduzindo em 40% os custos para um asfalto normal com essa expectativa de vida útil, Picado-Santos (2019) afirma que esse processo é uma solução muito boa para camadas superficiais de pavimentos de estradas, pelo menos para tráfego de baixo a médio.

Já Pinheiro (2004) estudou a substituição de 2,5% da mistura total por borracha, em três granulometrias diferentes, trocando uma parte do agregado mineral. As misturas com partículas de borracha de 2,0 a 0,075 mm apresentaram um excelente comportamento mecânico quanto ao módulo de resiliência e resistência à tração, quando comparadas às misturas convencionais. Além disso, verificou-se que o tempo de absorção é importante para o processo seco, pois é o fator que aproxima o processo seco do processo úmido, melhorando o seu resultado quanto ao volume de vazios e ao comportamento mecânico.

Bertollo (2002) realizou ensaio de resistência à compressão diametral dinâmico e ensaio de resistência à tração por compressão diametral utilizando 1,0 e 2,0% de borracha em um processo seco e com duas granulometrias de borracha, em substituição de parte do agregado. Consideraram-se tempos de absorção de zero,

duas e quatro horas a 150° C. Esses ensaios foram comparados a uma mistura de controle com 6,2% de CAP 20, em que foi observado que a adição de partículas de 1,18 a 0,15 mm propiciou a melhoria no desempenho quanto à deformação permanente. Ainda, maiores teores de borracha agrupados a menores tamanhos resultaram em menores módulos de resiliência, e maiores teores de borracha apresentaram menores resultados de resistência à tração.

Deste modo, Chavez (2019) concorda e aponta que a baixa qualidade no processo seco é por falta de interação, que era necessário ter um tempo para absorção entre 60 e 180 minutos antes de colocar a mistura no local. Apesar disso o desenvolvimento da borracha com pré-absorção abriu a possibilidade de usar esta tecnologia em um processo conhecido como semi-úmido (SWP) que mantém os benefícios oferecidos pela borracha sem as desvantagens dos outros dois processos.

Nas amostras de Chavez (2019) o processo seco (DP) e semi-úmido foram realizados em dois conjuntos de amostras, o primeiro sem tempo de absorção e o segundo com 30 min. Os resultados mostraram que para o tempo de absorção, a mistura DP mostrou um comportamento inferior ao da mistura SWP, principalmente na impermeabilidade. Também revelaram que a mistura de SWP com o tempo de absorção, superou os resultados obtidos pelo processo úmido.

Já Tahami (2019) pesquisou o uso de alto teor de borracha somada a diferença que se dá com o tempo de absorção (tempo de cura), o agregado foi substituído por 20, 40 e 60% de pó pneu (CRP), em peso. Analisou as propriedades mecânicas das misturas como Impermeabilização, módulo de rigidez, resistência ao sulco e à fadiga.

Segundo os resultados de Tahami (2019), a maior e a menor resistência à umidade foram obtidos para as misturas de (20% de CRP + 2 hora de tempo de cura) e (60% de CRP sem tempo de cura), respectivamente. Contudo, ao sujeitar a mistura de 60% de CRP a 2 horas de tempo de cura, a resistência à umidade dessa mistura foi aumentada em até 77%. Já os resultados do teste de fadiga revelaram que maiores teores de CRP tem um efeito inverso no desempenho contra a fadiga. Resultado esse com uma melhora significativa quando há o processo de cura, pois melhora coesão e adesão da interface entre o agregado e o aglutinante.

Tahami (2019) indica que a aplicação simultânea do processo de cura e da CRP muito fina, melhora consideravelmente a resistência das misturas de asfalto contra falhas. Pois, para todas as amostras e ensaios é evidente os benefícios do processo de cura de 2 h antes da compactação.

Contudo, com objetivo de aumentar a resistência e a durabilidade, Gong (2019) pesquisou a utilização de um revestimento contendo cimento Portland na borracha, com a finalidade de melhorar o desempenho na ligação entre o agregado, a borracha e o ligante de asfalto. Os resultados mostraram que o asfalto com borracha revestida de cimento se aproxima da estabilidade do asfalto convencional. Nas trincas por fadiga, apresentou uma resistência superior à das misturas com borracha não tratada. Porém diminuiu a resistência à tração e aumentou a possibilidade de corrugações.

Outro autor para otimização o método seco, Bakheit (2019) desenvolveu e modificou, denominando processo complexo. Alterando basicamente o controle tecnológico e o momento da inclusão do pó de pneu, colocando o pó de borracha após a mistura dos agregados com o ligante. Comparando quanto à estabilidade, deformação e impermeabilidade, os três métodos de mistura (úmido, seco e complexo). Os resultados mostraram que o método complexo foi o que obteve os melhores resultados, concluindo que esse método é eficaz no aumento da vida útil do pavimento até em condições de tráfego intenso.

2.5 ENSAIOS EM REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

No projeto de pavimentos betuminosos é indispensável a determinação do teor adequado de asfalto, garantindo assim a resistência e conseqüentemente a durabilidade ao revestimento. O ensaio *Marshall* é uma das metodologias para obter-se a dosagem de misturas asfálticas mais utilizadas mundialmente, fazendo uso da compactação por impacto. É considerado o método mais usado no Brasil, normatizado pela DNER-ME 043/95.

Este ensaio proporciona alternativas para escolha do teor de ligante asfáltico a ser utilizado, pois com falta de ligante o pavimento apresenta desagregação e por excesso do mesmo, a superfície fica escorregadia e deformável. Sendo assim, a quantidade ideal garante o melhor comportamento da mistura, atendendo às

especificações da norma DNIT 031/2004 – ES. No Brasil, é comum ser utilizado o teor de ligante correspondente a um volume de vazios de 4% (DNIT, 2006).

Na preparação do corpo de prova para o ensaio *Marshall* é necessário que o ligante seja aquecido em tal temperatura em que a viscosidade seja de (170 ± 20) cSt para ser misturado aos agregados. Mistura essa preferencialmente mecânica para garantir a homogeneidade em tempo (2 a 3 min) e temperatura requeridos. Já a temperatura de compactação do corpo de prova é aquela em que o ligante apresente a viscosidade (280 ± 30) cSt. O ligante só deve ser aquecido na quantidade exata que irá ser utilizada no corpo de prova, além de estar coberto durante o aquecimento.

Os agregados deveram ser previamente secos e a quantidade utilizada deve ser de tal forma que a mistura final (agregados+ligante) tenha 1200g. Para a mistura os agregados devem ser aquecidos 10 a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, não devendo ultrapassar a temperatura de 177°C, já o molde de compactação e o soquete a uma temperatura de 50 a 90°C.

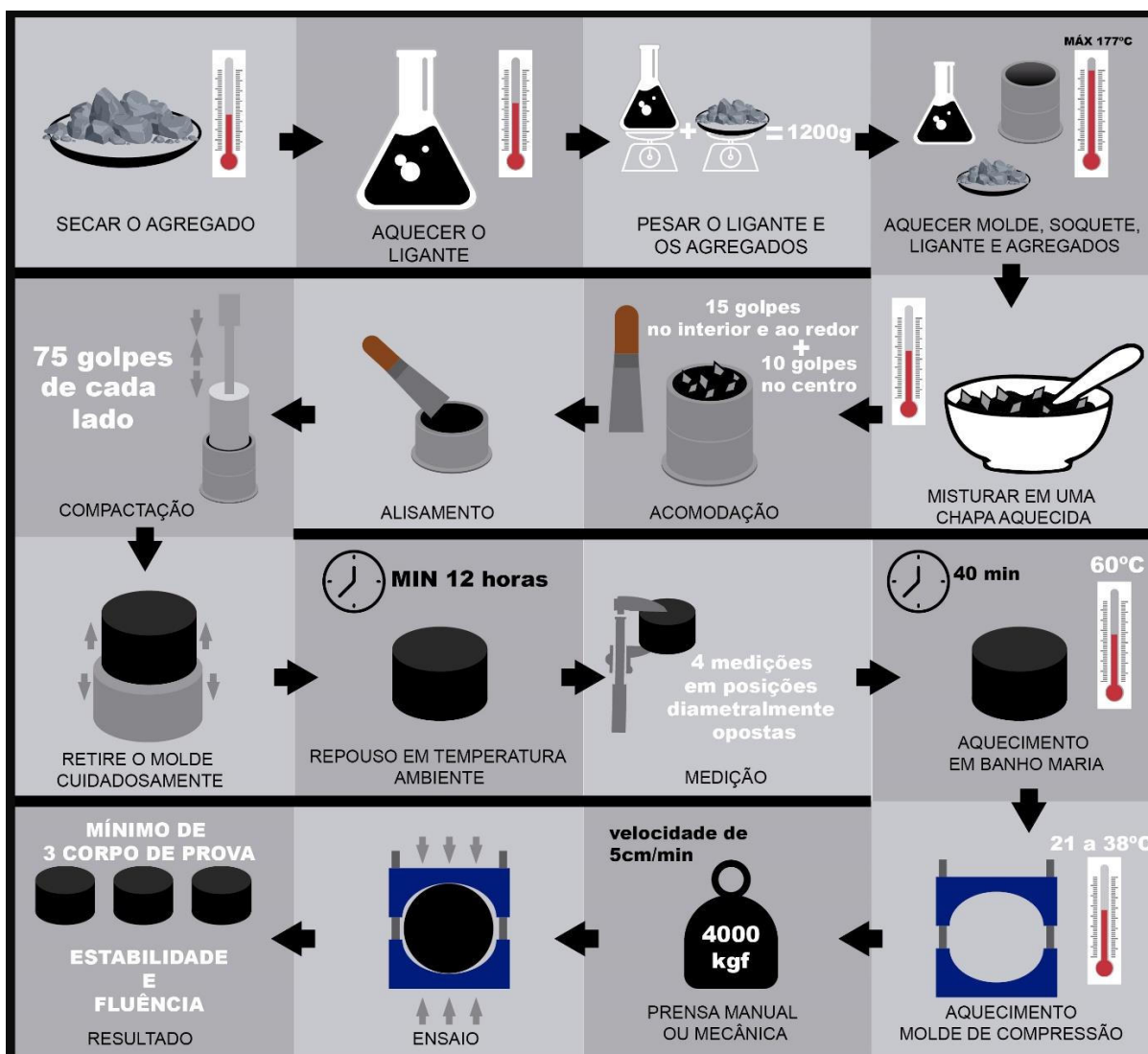
Após a mistura, se deve acomodar no molde com 25 golpes com uma espátula. O soquete de compactação deverá ter 4540 g de massa e uma altura de queda livre de 45,72 cm, será dado 75 golpes de cada lado do corpo de prova com o soquete.

Após a compactação, o molde deverá ser retirado cuidadosamente e o corpo de prova ficando 12 horas em repouso na temperatura ambiente. Depois deste procedimento será feita a média da altura de cada corpo de prova com o uso de paquímetro em 4 posições diametralmente opostas. O valor médio dessa altura será usado na Equação 1, fator esse usado para corrigir a estabilidade, dado através da Equação 1.

$$FC = 927,23 \cdot h^{-1,64} \quad (1)$$

A partir do ensaio *Marshall*, resulta-se nos parâmetros de estabilidade *Marshall* (EM), que representa a resistência máxima à compressão radial do corpo de prova, expressa em kgf; e a fluência *Marshall* (FM), que representa a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga nula até a carga máxima, expressa em décimo de milímetros. Parâmetros esses dados pelo valor médio de pelo menos 3 corpos de prova (DNER-ME 043/95). Figura 9 faz uma representação do passo a passo.

Figura 9 – Procedimento do ensaio Marshall



Fonte: O Autor (2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a moldagem dos corpos de prova e execução do ensaio *Marshall* estão listados abaixo:

- a) Cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) fornecido pela Empresa de Desenvolvimento Urbano e Rural do Município de Toledo (EMDUR);
- b) Pó de borracha de pneu com gramatura passante na peneira nº 60, fornecido pela empresa FM Pneus;
- c) Pedrisco (Brita zero) com DMC= 9,5mm fornecido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) campus Toledo e pó de pedra fornecido pela Coneresuper;

As Figuras 10 e 11 apresentam os materiais a serem utilizados nesta pesquisa.

Figura 10 - Cimento asfáltico de petróleo



Fonte: O Autor (2020)

Figura 11 - Agregados usados



Fonte: O Autor (2020)

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Pó de borracha

O resíduo de borracha de pneus é proveniente do processo de recauchutagem realizado junto a empresa FM pneus, localizada na cidade de Toledo-PR. O processo de recauchutagem consiste basicamente no reaproveitamento da estrutura do pneu onde uma nova banda de rodagem é colocada no mesmo. Durante a etapa de raspagem da antiga banda de rodagem dos pneus são gerados grânulos de borracha de diversas formas e tamanhos. Estes resíduos ficam no chão da empresa e, posteriormente, são recolhidos por uma mangueira de sucção para serem armazenados e destinados. De maneira geral, o principal destino destes resíduos é o uso no gramado sintético. A Figura 12 apresenta imagens do processo de recauchutagem e de obtenção do resíduo de pneus. Neste estudo foram utilizados os resíduos de pneu com granulometria passante na peneira nº 60 com abertura de malha igual a 2,4mm.

Figura 12 - Processo de obtenção do CRP



Fonte: Souza Silva (2018)

3.2.2. Caracterização granulométrica dos resíduos de pneu

A quantidade de material necessário no ensaio de granulometria é descrita pela norma DNER-ME 083-98 conforme a dimensão máxima do agregado em questão, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Massa mínima de amostra

| DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO (mm) | MASSA MÍNIMA DA AMOSTRA DE ENSAIO (kg) |
|---|--|
| 4,8 | 1 |
| 9,5 | 5 |
| 19 | 7 |

Fonte: Adaptada da DNER-ME 083-98

Para o peneiramento mecânico, a amostra deverá ser limpa e seca em estufa (110 ± 5) °C, esfriando em temperatura ambiente e em sequência é determinada sua massa total por balanças. As peneiras devem seguir a ordem decrescente com fundo e tampa. As peneiras utilizadas no ensaio de granulometria são apresentadas na Tabela 4. Para a realização do ensaio de granulometria do resíduo de borracha previamente selecionado, foram utilizados 1kg de material e as peneiras com abertura entre 4,8 e 0,15mm conforme mostra a Figura 13.

Tabela 4 - Conjunto de peneiras sucessivas

| SERIE NORMAL (mm) |
|-------------------|
| 76 |
| 38 |
| 19 |
| 9,5 |
| 4,8 |
| 2,4 |
| 1,2 |
| 0,6 |
| 0,3 |
| 0,15 |

Fonte: Adaptada da DNER-EM 038-97

Figura 13 - Ensaio de Granulometria



Fonte: O Autor (2020)

3.2.3 Ensaios preliminares e estudo de traço

Durante a iniciação científica estudou-se a respeito da quantidade de ligante asfáltico. Para tanto, foi usado o traço utilizado pela EMDUR (2019) para pavimentação de ruas da cidade. Sendo o traço utilizado composto por 50% de Brita 0 e 50% de pó de pedra, usando assim o teor de 5,5% ligante asfáltico.

Neste ponto, o estudo teve como objetivo realizar ensaios *Marshall* variando o teor de ligante para 6%. Desta forma, 6 corpos de prova foram executados segundo a metodologia da DNER-ME 043/95 no Item 2.5, sendo 3 corpos de prova para dosagem de ligante igual a 5,5% e 3 corpos de prova para dosagem de ligante igual a 6%. A Figura 14 mostra os procedimentos do ensaio, ao passo que, a Tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Os resultados obtidos foram apresentados no Encontro de Iniciação Científica da UTFPR (ENDICT, 2019) e no Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR (SICITE, 2019) realizado em Pato Branco/PR em 2019. Estes resultados mostraram um aumento da resistência e da fluência com a adição de 0,5% de ligante na dosagem do concreto betuminoso utilizado usualmente nos pavimentos da cidade. Chegando assim em um teor onde o pavimento não apresente desagregação. Desta forma, o teor de ligantes asfálticos a ser utilizado nesta pesquisa será superior ao valor utilizado pela EMDUR.

Tabela 5 - Resultado da iniciação científica

| Ligante (%) | Estabilidade(kgf) | Fluência (mm) |
|-------------|-------------------|---------------|
| 5,5 | 496 | 2,54 |
| 6 | 689 | 4,58 |

Fonte: Tiburcio (2019)

Figura 14 - Procedimento realizado na iniciação científica



Fonte: Tiburcio (2019)

Foram feitos ensaios preliminares com objetivo de se obter um parâmetro para o traço utilizado no município de Toledo com a adição pó de borracha. Por ser um ensaio preliminar, não seguiu a norma no que diz respeito ao número mínimo de corpos de prova, sendo assim feito apenas um corpo de prova para cada traço. Este ensaio usou o 6% de ligante já usado na iniciação científica.

Substituiu-se uma parte do agregado (pó de pedra) por borracha (2% de substituição na massa). Esse percentual de 2% foi definido conforme apresentado na literatura em Bertollo (2002), onde o autor obteve bons resultados para uma granulometria fina com este percentual, porém outra pesquisa Barbosa (2016), apontou a substituição de 2% com insatisfatória pois não atingiu os valores mínimos definidos pela norma DNIT 031/2006. Neste aspecto e visando um maior consumo de resíduos de pneus, foi verificada a possibilidade do uso de 2% de resíduo de pneus no traço. Se buscou também analisar a influência do tempo de absorção na mistura do ligante com CRP. Uma vista do ensaio é apresentada na Figura 15 e a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos.

Figura 15 - Realização do ensaio Marshall



Fonte: O Autor (2020).

Na Figura 15 podemos ver que o ligante conseguiu cobrir todos os seus agregados, mostrando assim que a quantidade ligante foi o suficiente.

Tabela 6 - Ensaio preliminar

| CP | Borracha (%) | Tempo de absorção (min) | Estabilidade(kgf) |
|----|--------------|-------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 120 | 485,3 |
| 2 | 2 | 0 | 305,3 |

Fonte: O Autor (2020)

A Tabela 6 mostra a importância do tempo de absorção entre o ligante e a borracha, devido ao benefício apontado nesse ensaio, os ensaios foram feitos com esse período de cura (Tempo de Absorção).

Visto na Tabela 6 que a estabilidade com a substituição de 2% de borracha não chega nos 500 kgf, valor mínimo exigido para a camada de rolamento pela Norma DNIT 031/2006 – ES, porém com a proximidade ao valor limite, sugere-se para este estudo uma maior dosagem de ligante. Além disso, ressalta-se que foi moldado apenas um corpo de prova, sendo, segundo a norma (DNER-ME 043/95), necessários três corpos de prova para análise. Além disso, outros estudos (BERTOLLO, 2002; BARBOSA, 2016; TAHAMI, 2019) demonstram que para viabilizar o uso do resíduo de pneus faz-se necessário um maior teor de ligante.

3.2.4. Procedimentos experimentais

Na pesquisa foram analisados os resultados das diferentes dosagens de ligantes em diferentes traços de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e o efeito da borracha de pneus inservíveis na substituição de uma parcela do pó de pedra, quanto a sua estabilidade e fluência *Marshall*. Para tanto, a Tabela 7 apresenta um resumo das características das misturas que foram analisadas. O percentual de 2% de substituição de pó de borracha foi definido nos ensaios preliminares, sendo os resultados apresentados no Item 3.2.3.

Além disso, a amplitude do teor de ligante foi definido a partir das literaturas. FHWA (1993) recomenda teores de ligante entre 7,5 a 9,0% por produzir um menor índice de vazios. Por outro lado, Barbosa (2016) recomenda o uso de teor de ligante de 6,5% para misturas com adição de 1,0% de borracha. Desta forma, os valores de ligante utilizados nesta pesquisa serão entre 6,5 a 7,5%. Conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Traço

| Identificação | Brita 0 | Pó de Pedra | Pó de pneus | Teor de ligante |
|---------------|---------|-------------|-------------|-----------------|
| Mistura 1 | 50% | 50% | - | 6,50% |
| Mistura 2 | 50% | 48% | 2% | 6,50% |
| Mistura 3 | 50% | 50% | - | 7% |
| Mistura 4 | 50% | 48% | 2% | 7% |
| Mistura 5 | 50% | 50% | - | 7,50% |
| Mistura 6 | 50% | 48% | 2% | 7,50% |

Fonte: O Autor (2020)

Tendo em vista os diferentes traços na Tabela 7 e de acordo com a norma (DNER-ME 043/95) foram preparados 3 corpos de prova para cada identificação, para a realização do ensaio de estabilidade e fluência *Marshall*, totalizando 18 corpos de prova.

Para a preparação dos corpos de prova, os agregados foram lavados e secos em estufa até massa constante, conforme a Figura 16. Segundo DNER-ME 043/95 na elaboração dos corpos-de-prova deve-se esquentar a temperatura 100°C apenas a quantidade exata de agregados e de ligante capazes de produzir um corpo-de-prova com cerca de 1200 g e $63,5 \pm 1,3$ mm de altura, como pode ser visto na Tabela 8 para cada traço. Visto a importância do tempo de absorção o ligante foi pesado e misturado com a borracha uma hora antes das misturas com os agregados, assim garantindo o tempo de 60 min de absorção entre o ligante e a CRP (TAHAMI, 2019; PINHEIRO, 2004).

Figura 16 – Lavagem, secagem e pesagem



Fonte: O Autor (2020)

Tabela 8 - Dosagens

| Mistura | Brita n°0 (g) | Pó de Pedra (g) | Pneu (g) | Ligante (g) | Teor de Ligante |
|---------|---------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 1 | 561 | 561 | 0 | 78 | 6,5% |
| 2 | 561 | 538,6 | 22,4 | 78 | 6,5% |
| 3 | 558 | 558 | 0 | 84 | 7,0% |
| 4 | 558 | 535,7 | 22,3 | 84 | 7,0% |
| 5 | 555 | 555 | 0 | 90 | 7,5% |
| 6 | 555 | 532,8 | 22,2 | 90 | 7,5% |

Fonte: O Autor (2020)

Colocou-se os agregados aquecidos na temperatura 110°C em um recipiente em cima de uma chapa aquecida a 150°C onde foi feita a mistura com o ligante, feita de modo manual por 2 a 3 minutos até se observar homogeneidade e completa cobertura dos agregados pelo ligante. Para os traços contendo borracha vale ressaltar que a mistura ligante/borracha foi realizada anteriormente. Vale dizer que os recipientes contendo os agregados minerais devem estar numa temperatura aproximadamente 10°C a 15°C acima da temperatura de aquecimento do ligante, não devendo ultrapassar a temperatura de 177°C. Processo este demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Mistura na chapa aquecida



Fonte: O Autor (2020).

A compactação foi realizada utilizando o molde de compactação e o soquete, limpos e aquecidos previamente de 90 a 150°C. Pelo fato do soquete de compactação ser robusto para estufa, ele foi colocado em cima da chapa de maneira vertical, portanto aquecendo somente a parte que entra em contato com o corpo de prova.

Desta forma, o molde foi posicionado no suporte de compactação e introduz-se nele uma folha de papel filtro, de dimensões conforme a seção do molde. Colocou-se a mistura no molde, de uma só vez e acomodou a mistura quente com 15 golpes vigorosos de espátula ao redor e 10 golpes no centro, conforme a Figura 18, em sequência retira-se a parte superior do molde e alisa o corpo de prova.

Figura 18 - Acomodação no molde de compactação



Fonte: O Autor (2020)

Realocou o anel superior e aplica-se 75 golpes com o soquete sobre a mistura em cada lado do corpo de prova. Após a compactação, o corpo-de-prova foi retirado do molde com auxílio de um extrator de amostras hidráulico, colocando-o em seguida numa superfície limpa e plana, permanecendo em repouso durante 12 horas. Procedimento esse demonstrado na Figura 19. A altura do corpo-de-prova é medida com o paquímetro, conforme a Figura 20. Adotando como altura o valor da média aritmética das quatro leituras. Valor esse utilizado na Equação 1 para obtenção do fator de correção.

Figura 19 - Extrator de amostras e repouso dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2020)

Figura 20 - Mensuração da altura



Fonte: O Autor (2020)

Os corpos-de-prova ficaram na estufa a $60 \pm 1^\circ\text{C}$, por um período de 120 minutos conforme preconiza a norma DNER-ME 043/95, conforme a Figura 21. Em seguida colocou-se cada corpo-de-prova no molde de compressão, que estava aquecido na temperatura de 21 a 38°C . Foi adicionado ao computador da prensa o valor da altura para cada corpo de prova. Em sequência o molde foi posicionado na prensa automática onde realizou-se o ensaio Figura 21 a uma velocidade de 5 cm por minuto até o rompimento do corpo-de-prova, o valor máximo observado foi lido e anotado, uma vez que, a prensa já multiplicava o valor da estabilidade *Marshall* pelo fator de correção dado na Equação 1 para cada corpo-de-prova. A fluência foi obtida no momento em que o corpo-de-prova se rompe. Já o quociente *Marshall* se dá pela divisão da estabilidade *Marshall* pela fluência.

Figura 21 - Estufa e ensaio Marshall



Fonte: O Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ALTURA

Conforme a Norma DNER-ME 043/95 do ensaio *Marshall*, foram mensuradas as medidas dos corpos de prova em 4 direções, sendo determinada a sua média aritmética. A Tabela 9 apresenta os resultados médios de altura para cada corpo de prova, onde cada traço tem 3 corpos de prova (A, B e C), sendo os números ímpares sem borracha e os números pares com borracha, seguindo a mesma nomenclatura apresentada anteriormente na Tabela 8.

Tabela 9 - Média da altura

| Corpo de Prova | MISTURA | | | | | |
|----------------|---------|------|------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 58,6 | 62 | 60,3 | 63 | 60,9 | 67,4 |
| B | 58,2 | 62,7 | 60,8 | 64,2 | 62,8 | 66,7 |
| C | 58 | 63,4 | 58,2 | 63,2 | 60,5 | ----- |
| Média total | 58,3 | 62,7 | 59,8 | 63,5 | 61,4 | 67,1 |

Fonte: O Autor (2020).

Analisando as alturas médias na Tabela 9 é evidente a diferença entre os corpos de prova que possuem borracha e os que não. Essa alteração se dá pela diferença de peso específico entre a borracha e o pó de pedra, dando um volume maior aos corpos de prova com borracha. Outro ponto é o corpo de prova 'C' do traço 6, que não foi possível mensurar sua altura, pois deformou após a compactação, fornecendo um primeiro indicativo de que uma dosagem de ligante igual a 7,5% com 2% de borracha não é adequado a moldagem de corpos de prova com os materiais utilizados. Na Tabela 10 temos os resultados do fator de correção usando a Equação 1 que é relacionada à média de altura de cada corpo de prova, nesse ponto é importante notar quanto menor a altura maior o fator de correção (FC).

Tabela 10 - Fator de correção

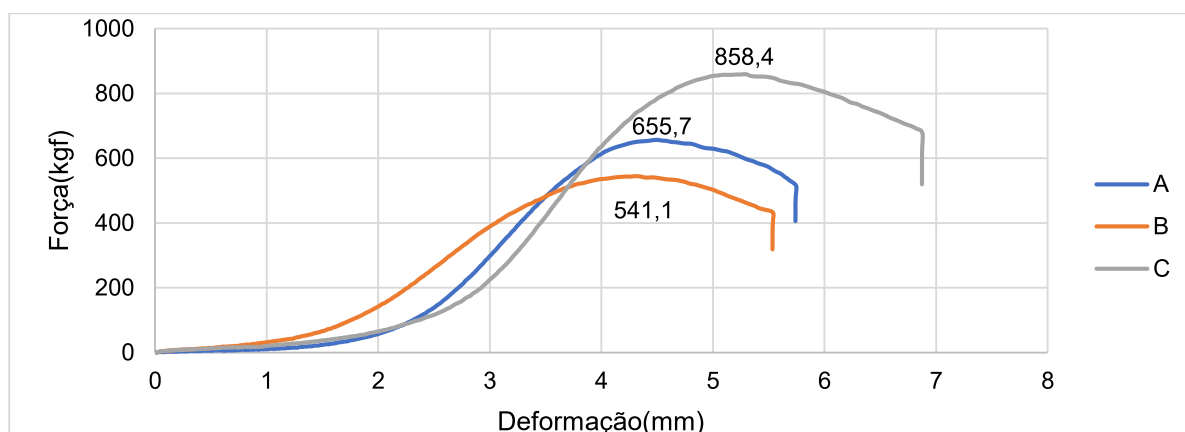
| Mistura | A | FC | B | FC | C | FC |
|---------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 58,6 | 1,169 | 58,2 | 1,182 | 58,0 | 1,189 |
| 2 | 62,0 | 1,066 | 62,7 | 1,046 | 63,4 | 1,027 |
| 3 | 60,3 | 1,115 | 60,8 | 1,100 | 58,2 | 1,182 |
| 4 | 63,0 | 1,038 | 64,2 | 1,007 | 63,2 | 1,033 |
| 5 | 60,9 | 1,098 | 62,8 | 1,044 | 60,5 | 1,109 |
| 6 | 67,4 | 0,929 | 66,7 | 0,945 | ----- | ----- |

Fonte: O Autor (2020)

4.2 ENSAIO MARSHALL

Foram feitos os ensaios, com três corpos de prova para cada mistura, conforme a DNER-ME 043/95. A Figura 22 mostra valores obtidos para o traço da mistura 1. É importante frisar que essa é a força aplicada pela prensa, portanto não é estabilidade *Marshall*, pois não foram multiplicadas pelo fator de correção relacionado à altura.

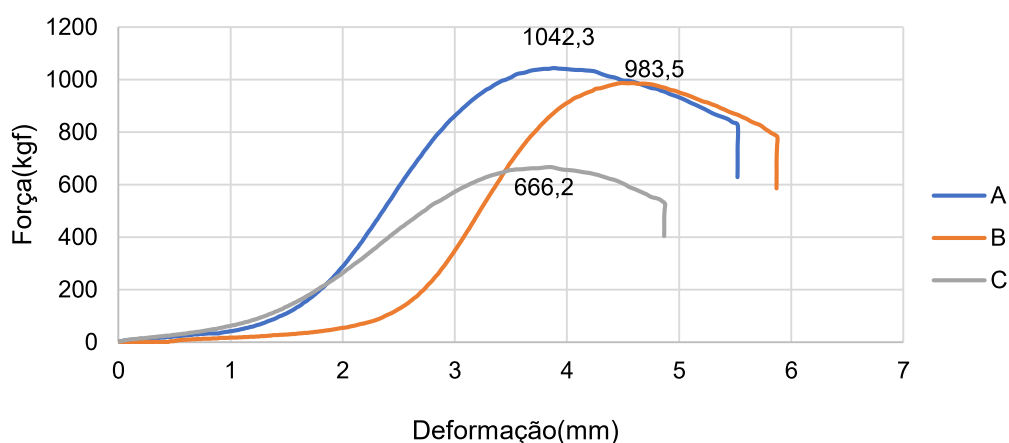
Figura 22 - Mistura 1 (sem pneu e 6,5% de ligante)



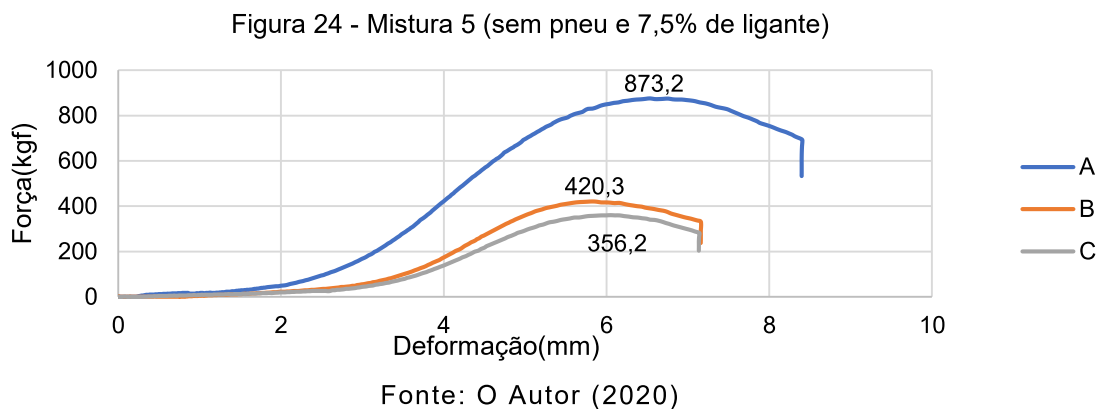
Fonte: O Autor (2020)

A Figura 23 e 24 a seguir representam os outros traços não contendo borracha, onde comparando as duas Figuras é possível perceber uma diminuição da força suportada com um aumento de 0,5% no teor de ligante, contida na Figura 24.

Figura 23 - Mistura 3 (sem pneu e 7% de ligante)

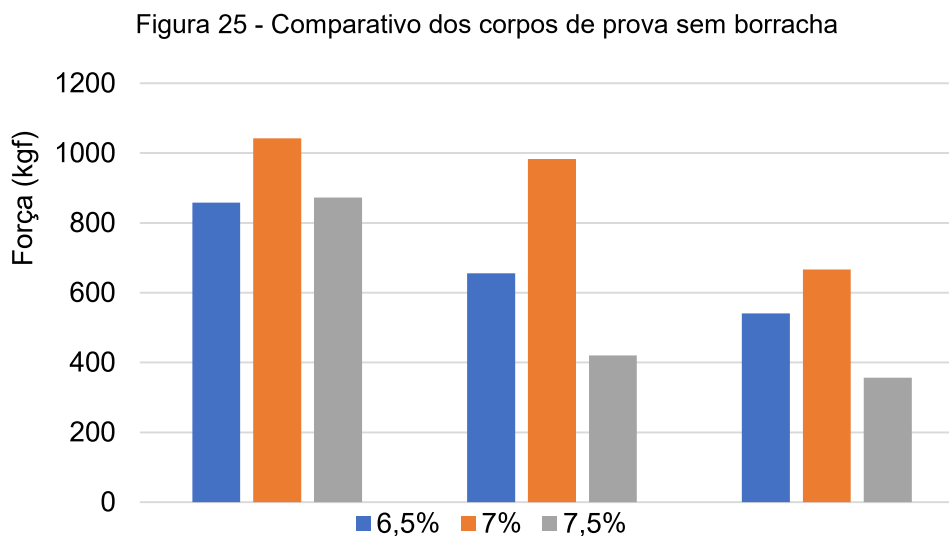


Fonte: O Autor (2020)



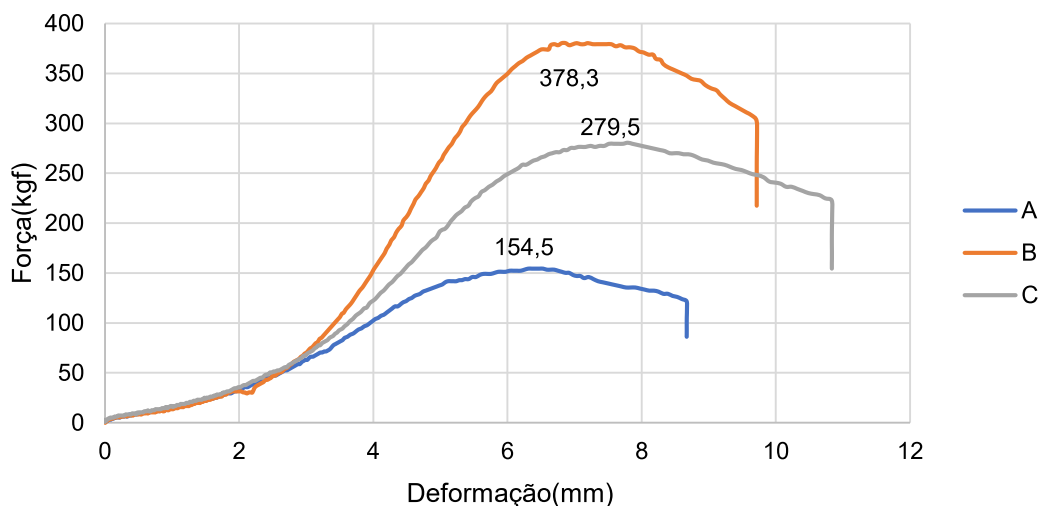
Outro ponto é grande variação no gráfico na Figura 24, chegando no coeficiente de variação a 50,93%, comparando com as misturas das Figura 22 e 23, onde o coeficiente não chega a 23%. Esses valores altos podem estar ligados ao reaquecimento do ligante, uma vez que o ligante fornecido já havia sido aquecido por algumas vezes para uso na EMDUR o que não é recomendado pela norma DNER-ME 043/95, pois altera suas características físico-químicas do produto. Outro ponto é a falta do medidor de viscosidade para saber a temperatura na qual o betume chega na viscosidade pedida na norma DNER-ME 043/95.

A Figura 25 apresenta uma comparação ordenada agrupando os corpos de prova de maior resistência para o menor para cada traço. Nesta figura todos os corpos de prova são de controle, portanto não possuem borracha. Podemos ver que os corpos de prova do traço com teor de 7% de ligante, representados pela cor laranja foi o que apresentou os melhores resultados nos três agrupamentos.



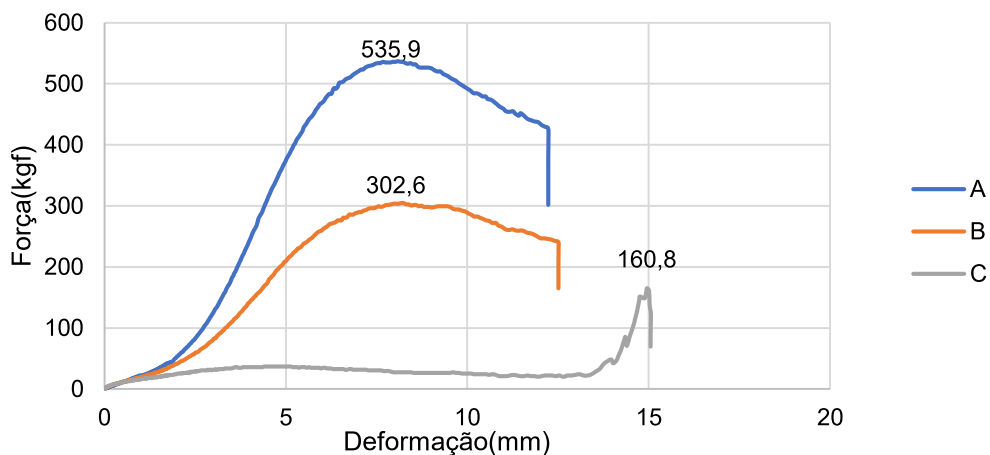
Para as misturas contendo borracha, temos uma drástica redução na resistência quando comparado com as misturas sem borracha, conforme pode ser observado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Mistura 2 (com pneu e 6,5% de ligante)



Fonte: O Autor (2020)

Figura 27 - Mistura 4 (com pneu e 7% de ligante)



Fonte: O Autor (2020)

Outro ponto é o coeficiente de variação chegando em 41% na mistura 2 e 56% na mistura 4. Neste caso, observa-se que a incorporação de borracha com os materiais utilizados não apresentou valores de resistência que atingissem o mínimo estipulado em norma. Todavia, observa-se que os corpos de provas, mesmo apresentando menor resistência, apresentaram de maneira geral maiores deformações em relação aos corpos de prova sem borracha, demonstrando assim

que, de maneira geral, a incorporação de borracha promove maior deformação antes da ruptura dos corpos de prova.

Assim pode-se observar a fluência, visto que os traço com borracha tiveram um alto valor nesse quesito, ela é um fator importante pois mesmo com um valor muito alto de estabilidade com uma baixa fluência não é desejável, visto que os pavimentos construídos provavelmente desenvolverão rachaduras devido a movimentos cargas pesadas, conforme apresentado por Akbulut (2007).

Para a mistura 6 o primeiro corpo de prova desmanchou depois da compactação e os outros dois desmancharam no aquecimento a 60°C para a realização do ensaio compressão, como pode-se visto na Figura 28 e 29. Portanto, isso demonstrou que o teor de ligante estava muito alto para a quantidade de borracha usada. Assim, constatou-se que dosagens de 7,5% de ligante com 2% de incorporação de borracha de pneus acaba prejudicando a resistência do concreto asfáltico.

Figura 28 - Corpo de prova desmanchando



Fonte: O Autor (2020)

Figura 29 - Excesso de ligante



Fonte: O Autor (2020)

4.3 ESTABILIDADE MARSHALL

Aqui apresenta-se o valor da estabilidade Marshall corrigida pelo fator de altura dada pela Equação 1, onde a altura média de cada corpo de prova foi utilizada, sendo calculada a estabilidade Marshall conforme apresentado na Tabela 10 para cada corpo de prova. Na Tabela 11 podem ser vistos os valores de estabilidade Marshall para cada corpo de prova das misturas que não possuem borracha no seu traço, chegando assim, em uma média para cada mistura. Um ponto importante a se observar é que apenas dois dos nove corpos de prova não atingiram o valor mínimo da norma DNER-ME 043/95, que é de 500kgf, porém na média a mistura atendeu ao critério normativo. A justificativa para este fato é grande variação de dado que possivelmente decorre das características do ligante asfáltico (reaquecido para reutilização na EMDUR) ou ainda falta do medidor de viscosidade para saber qual a temperatura de aquecimento, para resolver isso foi usado a temperatura de aquecimento a 110°C que a EMDUR utiliza.

Tabela 11 - Estabilidade Marshall para misturas sem borracha

| Corpo de Prova | Mistura 1 - 6,5% de ligante (kgf) | Mistura 3 - 7% de ligante (kgf) | Mistura 5 - 7,5% de ligante (kgf) |
|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| A | 767,7 | 1165,0 | 960,6 |
| B | 643,5 | 1085,8 | 439,7 |
| C | 1021,9 | 787,6 | 399,8 |
| Média | 811,0 | 1012,8 | 600,1 |

Fonte: O Autor (2020)

Na Tabela 12 são apresentados os valores de estabilidade Marshall para os corpos de prova que possuem borracha no seu traço.

Tabela 12 - Estabilidade Marshall para misturas com borracha

| Corpo de Prova | Mistura 2 (com pneu e 6,5% de ligante) | Mistura 4 (com pneu e 7% de ligante) | Mistura 6 (com pneu e 7,5% de ligante) |
|----------------|--|--------------------------------------|--|
| A | 164,6 | 557,4 | 0 |
| B | 398,0 | 302,1 | 0 |
| C | 288,2 | 170,4 | 0 |
| Média | 283,6 | 343,3 | 0 |

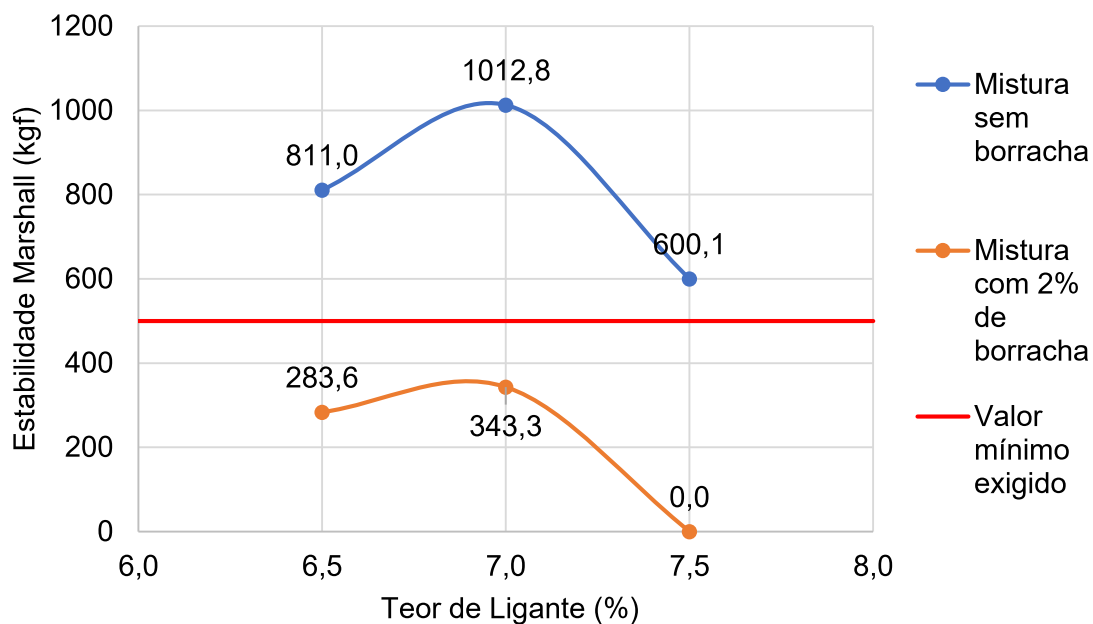
Fonte: O Autor (2020).

Na Tabela 12 é possível observar que apenas um corpo de prova atendeu ao critério da norma, porém nenhuma média atingiu esse valor, portando as misturas contendo 2% de borracha não alcançaram a estabilidade mínima da DNER-ME 043/95. Lembrando que a Mistura 6 os seus três corpos de prova não conseguiram adesão suficiente para a realização do ensaio, sendo assim representadas com seu valor de estabilidade em zero.

Desta forma, a justificativa para estes resultados apresentados na Tabela 12 decorre, além das questões supracitadas relacionadas ao reaquecimento do ligante e a temperatura, da baixa aderência entre a borracha e o ligante, que acaba afetando sua estabilidade *Marshall*. Outro ponto que foi usado 60 min de tempo de absorção, o que pode ter gerado uma diminuição na aderência quando comparado com os ensaios preliminares no Item 3.2.3 que foram feitos com 120min de tempo de absorção.

Na Figura 30 vemos duas curvas, a azul representando a estabilidade Marshall média das misturas que não possuem borracha no traço e em laranja as que possuem. Podemos perceber que a curva azul está inteiramente acima do limite mínimo de 500kgf da norma DNER-ME 043/95. Já a curva laranja está com todos os seus pontos abaixo. Também é possível observar o ponto ótimo no teor de ligante, sendo a porcentagem onde a estabilidade é mais alta.

Figura 30 - Curva do teor de ligante



Fonte: O Autor (2020)

Analisando tanto o gráfico da Figura 30 como as Tabelas 11 e 12, podemos notar que o formato das curvas se assemelha. Além disso, como já foi mencionado anteriormente, a grande variância nos dados pode estar ligada ao fato que o ligante já havia sido reaquecido o que prejudica a resistência e, por consequência, a estabilidade Marshall, mesmo sabendo deste fato desde o início do experimento, o objetivo era buscar fornecer melhorias para o traço utilizado na pavimentação do município de Toledo, devido a esse fato os parâmetros de dosagem adotados visavam simularas condições utilizadas na prática e por esse motivo não foi buscado outro tipo de ligante.

Na Figura 31 podemos verificar um corpo de prova após o rompimento, onde é possível observar que o ligante foi o suficiente para cobrir todos os agregados e também podemos perceber a presença do pó de borracha, entretanto, uma baixa aderência entre a borracha e o ligante reaquecido acabaram prejudicando sua estabilidade.

Figura 31 - Corpo de prova rompido



Fonte: O Autor (2020).

5. CONCLUSÃO

Por meio destes ensaios foi verificado o ponto ótimo no traço do concreto betuminoso utilizado usualmente nos pavimentos de Toledo-PR pela EMDUR, chegando num teor de 7% de ligante, comparando com os resultados obtidos na iniciação científica TIBURCIO (2019), onde houve um aumento da resistência de mais de 100% com a adição de apenas 1,5% de ligante na dosagem. Chegando assim, em um teor onde o pavimento não apresente desagregação, por falta de ligante, e não possui superfície escorregadia e deformável por conta do excesso do mesmo. Alcançado o objetivo de obter um pavimento asfáltico de melhor qualidade para o município. Um ponto a ser observar é lado financeiro, visto o valor do ligante e que com menores dosagens se alcança o valor mínimo, é necessário realizar um levantamento de custo-benefício para saber até que ponto esse ganho de resistência se traduz em vida-útil ao asfalto.

As misturas com borracha não tiveram adesão suficiente para atingir o mínimo da norma DNER-ME 043/95, porém, devido à grande variação de valores seria necessário a realização de mais corpos de prova para ter dados mais coesos, assim dando uma resposta mais confiável ao uso de 2% de borracha no traço pesquisado.

Outro ponto seria uma diminuição na porcentagem de borracha ou ainda uma diminuição no teor de ligante, visto que o intervalo de teor de ligante analisado era pequeno (6,5% a 7,5%) e o gráfico do ponto ótimo na Figura 30 possui um grande desvio padrão. Um demonstrativo disso é o ensaio preliminar no Item 3.2.3 com teor de 6% obtendo valores maiores dos com dosagem mais alta neste estudo.

Um fator interessante observado é a diferença na altura, visto que a substituição é em relação a massa, os corpos de prova contendo borracha tiveram uma altura maior devido ao peso específico do mesmo.

É possível observar também um grande aumento na deformação dos corpos de prova com borracha em seu traço, devido as propriedades da borracha sendo transmitidas para a mistura. A fluência é item importante na durabilidade do asfalto pois diminui a possibilidade de trincas. Devido ao fato que só usamos o ensaio *Marshall* para quantificar e qualificar o experimento, deixamos de fora propriedades

importantes que a borracha passa para o asfalto aumentando sua vida útil. Sendo assim são necessários mais estudos com mais corpos de prova e outros ensaios para mostrar o veredito sobre a possibilidade de implementação deste traço ou traço com menores teores de borracha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBULUT, H.; GÜRER, C. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**. Volume 42, Issue 5, May 2007, Pages 1921-1930.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Produção e vendas 2016: dados de produção**. Disponível em: <http://www.anip.com.br/arquivos/producao_vendas.pdf>. Acesso em: set/2019.
- BARBOSA, R. C. **Análise de misturas asfálticas modificadas com borracha de pneus pelo processo seco**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.
- BAKHEIT, I.; XIAOMING, H. Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design. **Construction and Building Materials**. Volume 220, 30 September 2019, Pages 278-284.
- BRASIL. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. 2009. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: set/2019.
- BRASIL. Resolução nº 558, de 15 abril de 1980. CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito. Disponível em: <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelink.php?numlink=225487>>. Acesso em: ago/2019.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. Petrobras: Abeda, Rio de Janeiro, v.1, p. 10, 2008. Disponível em : <https://www.researchgate.net/publication/264785655_Pavimentacao_Asfaltica_Formacao_Basica_para_Engenheiros/link/53efb03a0cf23733e812d792/download>. Acesso em: ago/2019.
- BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2002.
- CHAVEZ, F.; MARCOBAL, J. GALLEGRO, J. Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. **Construction and Building Materials**. Volume 205, 30 April 2019, Pages 164-174.
- DNER-EM 035/95 – Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos.
- DNER-EM 043/95 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall.
- DNIT 031/200 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.
- FHWA (1993) **Crumb Rubber Modifier – Design Procedures and Construction Practices. Workshop Notes**. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication N° FHWA-SA-93-011.

G1 - Globo. **Terreno abandonado com placentas enterradas é interditado em Delmiro**. 2016. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2016/11/terreno-abandonado-com-placentas-enterradas-e-interditado-em-delmiro.html>>. Acesso em: out/2019

GONG, F.; GUO, S.; CHEN, S. Strength and durability of dry-processed stone matrix asphalt containing cement pre-coated scrap tire rubber particles. **Construction and Building Materials**. Volume 214, 30 July 2019, Pages 475-483.

IBAMA; **RELATÓRIO PNEUMÁTICOS 2016**. Disponível em:

<<http://ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/ibama-relatorio-pneumaticos-2016.pdf>>. Acesso em: set/2019.

MACHADO, A. F. A. **Análise da Interação betume borracha em misturas betuminosas com borracha reciclada de pneus pelo processo a seco**.

Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães, 2013.

O TRANSPORTE MOVE O BRASIL - RESUMO DAS PROPOSTAS DA CNT AO PAÍS: **CNT**, 2018.

PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2019: CNT, 2019. Disponível em: <

<https://pesquisarodovias.cnt.org.br/downloads/ultimaversao/gerencial.pdf>>. Acesso em: out/2019.

PICADO-SANTOS, L. G.;CAPITÃO, S. D.;DIAS, J.L. F. Crumb rubber asphalt mixtures by dry process: Assessment after eight years of use on a low/medium trafficked pavement. **Construction and Building Materials**. Volume 215, 10 August 2019, Pages 9-21.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

RODRIGUES JORGE, M. R. P.; FERREIRA, O. P.; CLARETO NETO, S.

Aproveitamento de borracha de pneus inservíveis na produção de componentes para construção. In: **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**, 2004, Florianópolis, SC. Anais. Florianópolis, SC: ICTR, 2004.

SINICESP; **Ligantes Asfálticos**. 2010. Disponível em:

<<http://sinicesp.org.br/materias/2010/bt05a.htm>>. Acesso em: out/2019.

Sistema Nacional de Viação. Disponível em:<<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: set/2019.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI vol. 1. 1997.

SOARES, R. A.; ASSIS, E. M. **O uso da Borracha de Pneus na Pavimentação como uma Alternativa Ecologicamente Viável**. 2008. 15 p. Universidade Católica de Salvador, Salvador, BA, 2008.

SOUZA SILVA, L.; NASCIMENTO, F. R.; NOGUEIRA, M. H. P. Utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus na composição de asfalto. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**. Volume 4, n. 7 (2018).

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

TAHAMI, S. A.; MIRHOSSEINI, A. F.; DESSOUKY, S.; MORK, H.; KAVUSSI, A. The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. **Construction and Building Materials**. Volume 222, 20 October 2019, Pages 643-653

THE GLOBAL COMPETITIVENESS REPORT: **WORLD ECONOMIC FORUM**, 2017–2018.

TIBURCIO, Ariana Ramos; GIRON, Jonathan Luiz; BALESTRA, Carlos Eduardo Tino. Análise experimental do teor de cimento asfáltico de petróleo na resistência à compressão radial de concreto betuminoso usinado a quente, utilizado para pavimentação. **IX Seminário de Extensão e Inovação: XXIV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica**, Pato Branco – PR, 2019.

WAY, George. **History of Asphalt Rubber in Arizona**. 2012 Arizona Pavements/Materials Conference. Disponível em: <<http://pavement.engineering.asu.edu/wordpress/wpcontent/uploads/2012/12/Way.pdf>>. Acesso em: set/2019